

# **Automatsko rasklapanje dotrajalih elektroničkih proizvoda**

## ***Automatic disassembly of obsolete electronic products***

**L. Travaš<sup>1,\*</sup>, Z. Kunica<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

\*Autor za korespondenciju. E-mail: [lo.travas@gmail.com](mailto:lo.travas@gmail.com)

### **Sažetak**

Električni i elektronički (EE) proizvodi i oprema imaju značajan udio u suvremenoj potrošnji te slijedom toga i velik utjecaj na okoliš. Briga o okolišu i želja za ekonomičnim korištenjem prirodnih resursa čine razmatranje procesa recikliranja neizostavnim korakom, kako već na samom početku – pri konstruiranju EE opreme, tako, posebno, i kada se proces recikliranja mora realizirati, prethodno oblikovanim, odgovarajućim, sustavom. Postojeći destruktivni sustavi recikliranja uobičajeno su usmjereni na obrađivanje širokog spektra dotrajalih proizvoda istovremeno, zahtijevaju velika investicijska sredstva, nisu fleksibilni, a sekundarne sirovine dobivene obradom otpada sadrže nečistoće i opasne tvari. Kako bi se ovo unaprijedilo, na kraju životnog vijeka proizvoda kao alternativa se nameće automatsko rastavljanje proizvoda. Automatski sustavi za diskretno rasklapanje trenutačno se primjenjuju samo za pojedine otpadne EE proizvode. Razvoj tih sustava usko je povezan s primjerenim oblikovanjem i praćenjem životnog ciklusa proizvoda, napretkom robota i senzoričke te potražnjom za sekundarnim sirovinama i zakonskom regulativom. U radu su naznačene postavke oblikovanja proizvoda za recikliranje i postojeće tehnologije rasklapanja. Na primjeru tvrdog diska računala razmotreno je oblikovanje fleksibilnog automatskog sustava rasklapanja, koje uključuje: analizu proizvoda za rasklapanje, postavljanje funkcijskog plana demontaže, primjenu metode procjene vremena i troškove rasklapanja za varijante sustava s jednim i dva industrijska robota, specifikaciju opreme i računalno oblikovanje sustava.

**Ključne riječi:** automatsko rasklapanje, EE otpad, recikliranje

### **Abstract**

Electrical and electronic products and equipment (e-equipment) have a significant proportion of contemporary consumption and consequently a large impact on the environment. Caring for the environment and desire for economical use of natural resources constitute the process of recycling as an essential step, at the very beginning – when designing e-equipment, and particularly, when the recycling process must occur by previously designed, appropriate system. Existing destructive recycling systems are usually focused on the treatment of a wide range of products at the same time, requiring a large investment funds, they are not flexible, and secondary raw material obtained by treatment of waste contain hazardous substances and impurities. In order to improve this, at the end of the product life-cycle, the automatic disassembly is imposed as an alternative to present recycling systems. Automatic systems for discrete disassembly are currently applied only to

certain e-products. Development of these systems is closely related to the appropriate design and monitoring of the product life-cycle, the progress of robots and sensorics as well as the market demand for secondary raw materials and legislation. This paper gives basics of product design for recycling and the existing disassembly technologies. In the example of computer hard disk, development of flexible automatic disassembly system is considered, which includes: an analysis of product for disassembly, functional plan of disassembly, application of method for estimation of time and cost of disassembly with one and two industrial robots, specification of equipment and computer-aided design of disassembly system.

## 1. Uvod

Rastuća količina otpada koja se stvara od dotrajalih i odbačenih proizvoda predstavlja izazov za prirodu, državne vlasti, proizvođače, ali i sveukupnu populaciju. Svijest o potrebi za očuvanjem prirode, postroženi zakoni o zaštiti okoliša te odredbe vlada razvijenih zemalja o ponovnom korištenju proizvoda ili njihovih dijelova umjesto njihovog odlaganja na odlagalištima otpada, primoravaju proizvođače da nastoje u sve većoj mjeri otpad iskoristiti. Umjesto odlaganja, odbačeni se proizvodi mogu popraviti i ponovo upotrijebiti, preraditi, reciklirati ili, tek u krajnjemu, odložiti na odlagalištima otpada. Vraćanje vrijednih materijala i dijelova u proizvodni proces, smanjenje količine toksičnih tvari i količine otpada na odlagalištima, glavni su razlozi za razmatranje problema demontaže (rasklapanja) dotrajalih proizvoda, čime se podrazumijeva i uspostava pogona za demontažu, koji pak zahtijevaju odgovarajući organizacijski i tehničko-tehnološki angažman i stručnost, te novčana ulaganja. Nadalje, u cilju postizanja veće učinkovitosti, automatizacijom demontaže povećava se zahtjevnost pri planiranju i projektiranju takvih pogona.

U ovome radu prikazana je problematika recikliranja električnog i elektroničkog (EE) otpada, te je analizirana mogućnost uspostave automatiziranog sustava za demontažu tvrdog diska osobnog računala s ciljem stjecanja znanja i iskustava koji bi bili primjenjivi za oblikovanje demontažnih sustava i drugih, sličnih proizvoda.

## 2. Gospodarenje električnim i elektroničkim otpadom

Počevši od 1980-ih godina, neprekidan je rast količine i raznovrsnosti EE opreme na tržištu. Životni vijek takve opreme je kratak, osnovni proizvod je često popraćen različitim preinakama, što je uzrokovano prilagođavanjem potrebama potrošača.

EE uređaji i oprema predstavljaju sve proizvode koji su za svoje pravilno djelovanje ovisni o električnoj energiji ili elektromagnetskim poljima, kao i oprema za proizvodnju, prijenos i mjerenje struje. Kada posjednik odluči odbaciti svoju EE opremu (bilo zbog kvara ili zamjene za novi, bolji uređaj) tada ona postaje otpad.

Problematika rastuće količine EE otpada jedna je od ozbiljnih ekoloških tema s kojom se suočavaju članice Europske unije i Organizacije za ekonomsku suradnju i razvoj. Procjenjuje se da se iznos EE otpada svake godine povećava za 3 do 5 %. Pošiljke otpada unutar članica EU i OECD strogo su regulirane, a izvan granica EU-a i OECD-a zabranjeno je izvoziti opasni otpad (sadrži štetne tvari koje su reaktivne, eksplozivne, infektivne, kancerogene, ekotoksične itd.), što podrazumijeva i EE otpad. Prema smjernicama EU navedenim u Pravilniku o EE otpadu 2002/96/EC, nastali EE otpad potrebno je sanirati unutar članica EU, potiče se njegovo recikliranje, a sakupljanje se ne naplaćuje. [1]

Ovim se planom nastoji prije svega smanjiti količine na odlagalištima. Recikliranjem se u proizvodni ciklus ponovo vraćaju materijali (čelik, aluminij, bakar), čime se ostvaruje ušteda na energiji spram proizvodnje iz prirodnih izvora. Budući da EE otpad sadrži i kemijske elemente koji su opasni po zdravlje (olovo, živa, kadmij) potrebno je posvetiti posebnu



**Tablica 1. Značajke pri vrednovanju recikličnosti proizvoda i materijala [5]**

Recikliranje proizvoda	Recikliranje materijala
<ul style="list-style-type: none"> <li>- funkcionalna struktura proizvoda</li> <li>- stupnjevita struktura</li> <li>- kompleksnost</li> <li>- posao koji prethodi demontaži</li> <li>- demontiranje</li> <li>- demontaža bez uništavanja dijelova</li> <li>- mogućnost čišćenja</li> <li>- mogućnosti provjere</li> <li>- mogućnost identificiranja</li> <li>- mogućnost sortiranja</li> <li>- mogućnosti prerade</li> <li>- mogućnost ponovne montaže</li> <li>- mogućnost zamjene dijelova</li> <li>- prepoznavanje istrošenih dijelova</li> <li>- uporaba normiranih dijelova</li> <li>- automatizacija radnih koraka</li> </ul>	<p><b>Poslovi demontaže</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- broj operacija kod demontiranja</li> <li>- broj uputa za demontiranje</li> <li>- broj različitih operacija kod demontiranja</li> <li>- broj vezivnih elemenata</li> <li>- broj različitih vezivnih elemenata</li> <li>- pristupačnost</li> <li>- automatizacija poslova demontaže</li> <li>- rastavljanje</li> <li>- troškovi demontaže</li> <li>- broj potrebnih alata za demontiranje</li> </ul> <p><b>Razdvojitost</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- broj i trošak postupaka razdvajanja</li> <li>- mogućnost prepoznavanja materijala</li> <li>- broj materijala koji se mogu razdvojiti</li> <li>- broj materijala koji se ne mogu razdvojiti</li> </ul> <p><b>Iskoristivost</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ponovna iskoristivost</li> <li>- daljnje iskorištavanje</li> <li>- potrebni procesi iskorištavanja</li> <li>- stupanj postignutih rezultata</li> <li>- smanjenje kvalitete</li> <li>- stupanj onečišćenja</li> </ul>

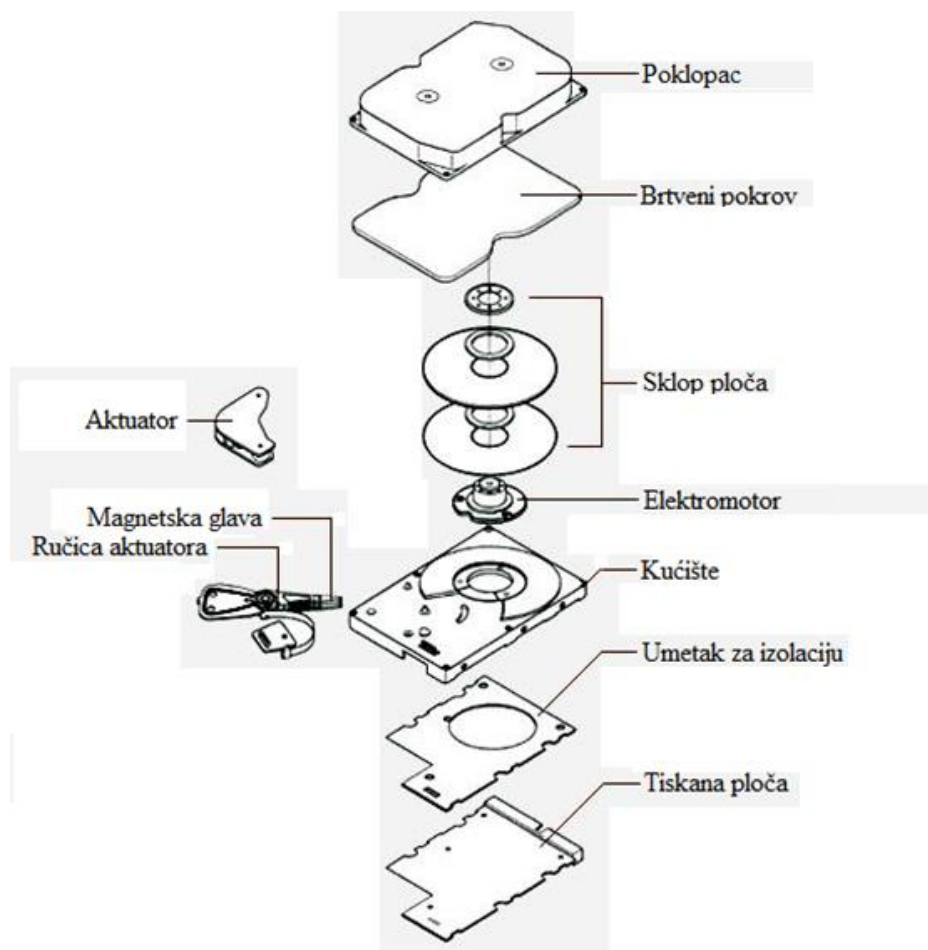
Vrednovanje tehnološko-ekonomskih karakteristika proizvoda za recikličnost rezultira ukupnom ocjenom recikličnosti.

#### 4. Analiza tvrdog diska za rasklapanje

Tvrđi disk neizostavna je komponenta osobnih računala, jednog od brojnih elektroničkih uređaja koji je tijekom posljednjih dvadesetak godina postao uobičajen u svakom kućanstvu ili uredu.

Ovaj proizvod izabran je za demontažu iz sljedećih razloga [6]:

- Količina proizvoda – izvješća proizvođača pokazuju da je u razdoblju od 2011. do 2013. godine ukupno isporučeno 1,753 milijardi tvrdih diskova diljem svijeta. [7]
- Standardizirana veličina – svi tvrdi diskovi s pločom veličine 3,5 inča imaju dimenzije kućišta 146x101 mm, dok visina iznosi 19 ili 25 mm. Prednost standardnih dimenzija kasnije se očituje u oblikovanju alata za manipulaciju, transport i skladištenje tvrdog diska i njegovih dijelova pri rasklapanju.
- Ponavljajuća struktura proizvoda – iako postoji nekoliko proizvođača tvrdih diskova (Seagate, Toshiba, Western Digital) struktura proizvoda je ista, što olakšava izbor redoslijeda operacija koje su potrebne da bi se on najlakše rastavio. Između ostaloga, olakšano je (automatizirano) prepoznavanje spojnih elemenata, jer se oni također nalaze na istim pozicijama. Putanje rasklapanja dijelova su pravocrtna, a spojni su elementi lako dostupni. Ugradbeni elementi tvrdog diska prikazani su slikom 2.



**Slika 2.** Ugradbeni elementi tvrdog diska

- Mali broj jednostavnih tehnika spajanja – rastavljanje tvrdog diska moguće je obaviti robotskom rukom s dva alata: odvijačem i hvataljkom. Odvijačem se odvijaju vijci (utora torx na glavi), dok je hvataljka potrebna za rastavljanje elemenata koji nisu povezani spojnim elementima, već oblikom. Ovime je skraćeno trajanje ciklusa rastavljanja za vrijeme potrebno za zamjenu alata.
- Materijali – istovrsni dijelovi tvrdog diska napravljeni su od istih ili sličnih materijala, što olakšava razvrstavanje. Važno je napomenuti da proizvod ne sadrži kapljevine ili gelove, odnosno tvari koje je potrebno uklanjati posebnim alatima.
- Stanje odbačenog proizvoda – kućište tvrdog diska osigurava zaštitu unutrašnjosti kako od fizičkih deformacija, tako i od prljavštine. Osim toga, radni uvjeti računala podrazumijevaju suhu i čistu okolinu, stoga je proizvod prije demontaže redovito neoštećen.
- Raspoloživost podataka – olakšana identifikacija modela i ekstrakcija relevantnih podataka iz proizvođačkih baza podataka. Vršiti se pomoću očitavanja barkôda koji se nalazi na poklopcu.

Rastavljanjem diska na dijelove omogućuje se razvrstavanje dijelova prema materijalima, dok je tiskanu pločicu potrebno dodatno obraditi da bi se odvojili materijali (usitnjavanjem, elektrostatskom i magnetskom separacijom).

Redoslijed rasklapanja uvjetovan je strukturom proizvoda, tj. potrebno je najprije rasklopiti vanjske dijelove (odvojiti poklopac od kućišta) da bi bilo moguće rastaviti unutrašnjost (sklop



ploča, aktuator, ručicu aktuatora itd.). Postojanje baznog dijela, kućišta, olakšava manipulaciju, odvijanje vijaka i odvajanje ostalih dijelova, pri čemu su putanje pravocrtnne, što pogoduje automatizaciji procesa. Zbog malih dimenzija dijelova operacije rasklapanja se ne izvode paralelno, nego slijedno, što uzrokuje produljenje vremena ciklusa rasklapanja.

## 5. Oblikovanje sustava za rasklapanje tvrdog diska

Demontaža (rasklapanje) je postupak u velikoj je mjeri inverzan montaži (sklapanju) pa su stoga načela, projektiranje i tehnička rješenja (oprema) obaju postupaka u mnogome podudarna. Tako montažni i demontažni sustavi u načelu iziskuju sličan pristup projektiranju, s razlikom u kretanju proizvoda: dok se proizvodi nakon montaže stavljaju na tržište, oni koji su nakon kraja životnog vijeka predviđeni za demontažu s tržišta se povlače i usmjeravaju na odgovarajuće lokacije, odnosno pogone za demontažu. Montaža se stoga može planirati ovisno o potražnji na tržištu, kompleksnosti proizvoda, varijantama i slično, dok je organizacija demontaže otežana zbog neujednačenih količina proizvoda za demontažu u određenim periodima, kvalitete proizvoda (deformacije, oštećenja ili preinake), dostupnosti informacijama itd. S druge strane, nakon demontaže i sortiranja materijala ne postoji problematika prodaje materijala, jer je potražnja za njima neprestana.

Demontaža dotrajalih proizvoda u svrhu ponovne uporabe dijelova učestala je u automobilske industriji [8] (nakon demontaže slijedi usitnjavanje neupotrebljivih dijelova i odvajanje metala od nemetalnih ostataka usitnjavanja). Automatizirana demontaža primjenjuje se i pri popravcima jednostavnih proizvoda, naprimjer europaleta: tvrtka Jointec razvila je sustav kojim se oštećene palete defektiraju, rastavljaju, zamjenjuju se potrebni dijelovi i palete se ponovno sastavljaju. Vrijeme ciklusa iznosi nekoliko minuta, a za upravljanje sustavom dovoljan je jedan radnik. [9]

### 5.1. Funkcijski plan rasklapanja i principijelna tehnička rješenja

Funkcijskim planom određuju se funkcije koje će biti potrebne za razvrgavanje odnosa između dijelova. Za funkcije se potom određuju principijelna tehnička rješenja.

Demontaža tvrdog diska zasniva se na sljedećemu funkcijskom planu [6]:

1. Gomilanje tvrdih diskova
2. Očitavanje modela tvrdog diska te prihvatanje kućišta i njegovo pomicanje
3. Snimanje pozicija vijaka poklopca te njihovo odvijanje
4. Zakretanje kućišta, snimanje pozicija vijaka tiskane pločice i njihovo odvijanje
5. Odvajanje poklopca i tiskane pločice
6. Snimanje pozicija vijaka koji pritežu unutarnje dijelove (sklop ploča, aktuator i ručicu aktuatora) te njihovo odvijanje
7. Odvajanje dijelova navedenih u koraku 6.
8. Snimanje pozicija vijaka elektromotora i njihovo odvijanje
9. Odvajanje elektromotora i otpuštanje kućišta.

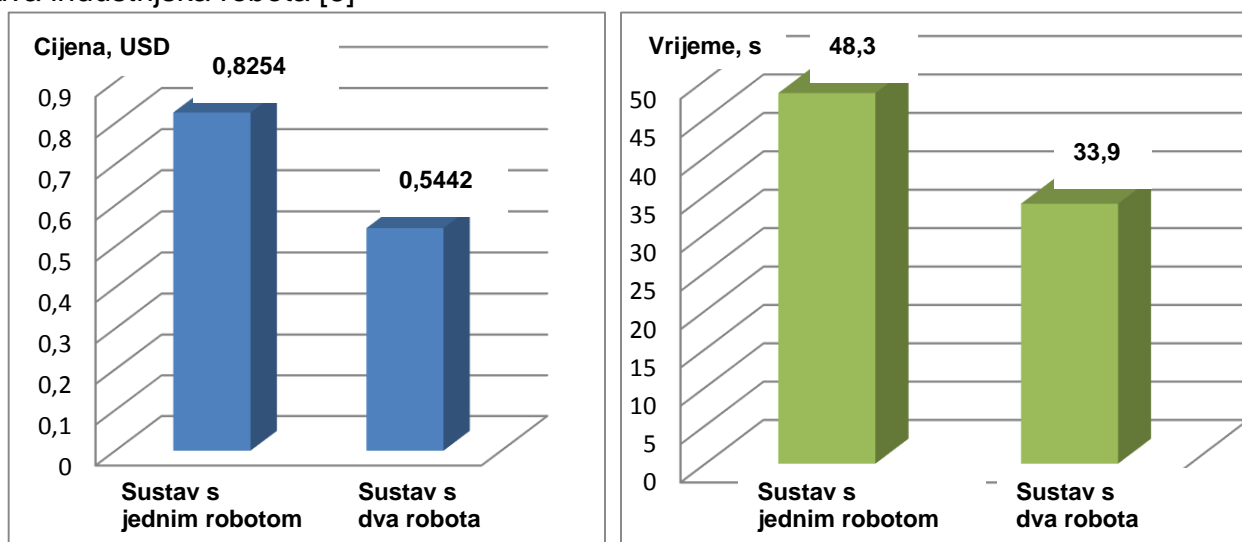
Dakle, manipulator prihvata tvrdi disk iz (ručno ili automatski punjenog) magazina (u kojemu su diskovi prethodno prostorno orijentirani), a čitačem barkôda se očitava model diska i ustanovljuje postoji li u bazi podataka. Ako postoji, primjenjuje se postojeći plan demontaže; ako ne postoji, proces demontaže i dalje teče automatski, ali uz povišeni nadzor, a izvedene operacije se bilježe i pohranjuju u bazi podataka, s time da se naknadno moraju verificirati. Manipulator prenosi tvrdi disk do steznog elementa, vizijski sustav snima pozicije vijaka na poklopcu, te se oni odvijaju odgovarajućim nastavkom torx na robotskoj ruci. Tvrdi disk se zatim zaokreće za 180° te se iste radnje ponavljaju za tiskanu pločicu. Drugi izvršni članak (hvataljka) na robotskoj ruci zatim odvajaju tiskanu pločicu i poklopac i odlaže ih u odgovarajuće spremnike. Nakon toga se snimaju pozicije vijaka unutarnjih dijelova, odnosno sklopa magnetskih ploča, aktuatora i ručice aktuatora. Robotska ruka odvijaju vijke, a

otpuštene dijelove prenosi i odlaže u spremnike. Elektromotor je posljednji sklop koji je ostao pričvršćen na kućište, pa se pozicije njegovih vijaka snimaju, oni se odvijaju, elektromotor se odvaja i pohranjuje u spremnik, a potom isto i kućište. Manipulator zatim prihvaća novi tvrdi disk i ciklus se odvija iz početka.

## 5.2. Procjena vremena i troškova rasklapanja

Za prije navedeni funkcijski plan procijenjena su vremena i troškovi rasklapanja pomoću metode DFA za robotsko sklapanje [10], pri čemu je konačno određen i potreban broj robota. Naime, iz opisa funkcija očito je da je za rasklapanje potrebno dvije vrste izvršnih članaka na robotskoj ruci. Iz tog razloga razmotrena je primjena sustava s jednim i s dva industrijska robota (Tablica 2.).

**Tablica 2.** Usporedba troškova i vremena rasklapanja, po komadu, za sustave s jednim i dva industrijska robota [6]



Proračun cijena rasklapanja i trajanja ciklusa za obje stanice izrađen je pod pretpostavkom da će se rasklopiti 150 000 tvrdih diskova. Cijena rasklapanja po proizvodu pomoću stanice s dva robota je otprilike 35 % jeftinija od one s jednim robotom, dok je trajanje ciklusa rasklapanja kraće za oko 30 %. Razlika proizlazi iz potrebe za promjenom alata kod stanice s jednim robotom. Iznos od 33,9 sekundi nije konačan, već se njemu treba pridodati vrijeme očitavanja barkôda i snimanje vizijskim sustavom. Ovo je procijenjeno na 4,5 sekundi, pa bi ukupno vrijeme ciklusa za stanicu s dva robota bilo 38,4 sekunde.

## 6. Specifikacija opreme i CAD oblikovanje sustava

Industrijski roboti oblika SCARA odlikuju se visokom preciznošću i brzinom te jednostavnošću – sa samo četiri stupnja slobode gibanja mogu izvršavati većinu jednostavnih montažnih i demontažnih zadataka. [11] Osim toga, cijena je u usporedbi s drugim robotskim konfiguracijama niža.

Stereovizijski sustav koristi dvije kamere koje snimaju isti objekt ali s različitih pozicija, čime se dobiva uvid u tri dimenzije. Ovo je nužno da bi se odredile pozicije vijaka te oblik dijelova koji se prihvaćaju hvataljkom.

Svi neoštećeni tvrdi diskovi na vanjskoj površini posjeduju naljepnicu na kojoj se, između ostalog, nalazi i barkôd, čime je pojednostavnjena identifikacija modela.

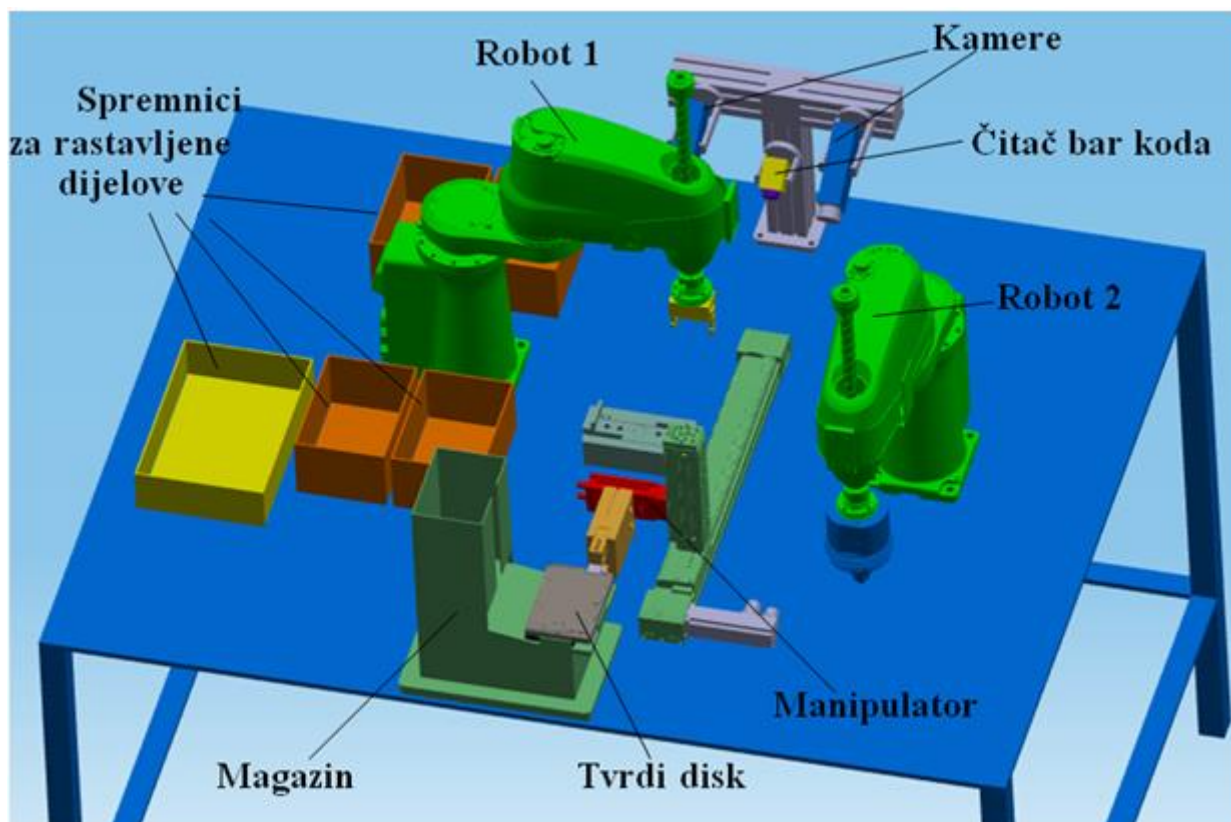
Manipulator je u sustav uveden zbog najjednostavnijih operacija – pomicanja i zakretanja kućišta, odnosno omogućava translaciju i rotaciju duž osi uz visoku preciznost i nisku cijenu opreme.

Specifikacija odabrane opreme, s cijenama, dana je tablicom 3.

**Tablica 3.** Speciifikacija opreme demontažnog sustava s cijenama [6]

Naziv opreme	Cijena, USD
Robot Adept Cobra s350 s kontrolerom, 2 komada	47 500
Vizijski sustav National Instruments s dvije kamere	7 900
Čitač barkôda Birch	200
Manipulator Festo s opremom	7 000
<b>Ukupno</b>	<b>62 600</b>

Nakon što je određena oprema robotske stanice, uslijedilo je njezino računalno oblikovanje programom Solidworks, korištenjem CAD datoteka preuzetih od proizvođača opreme (Slika 3.)



**Slika 3.** Automatski sustav rasklapanja s dva robota [6]

## 7. Zaključak

Automatizacija recikliranja izazovan je inženjerski zadatak, čije rješavanje uključuje analizu proizvoda te projektiranje, primjenu i razvoj adekvatnih sustava i tehnologija kojima se odbačeni proizvodi rasklapaju. Raznolikost, varijantnost i promjenljivost proizvoda prepreke su za projektiranje univerzalnog sustava za rasklapanje. Iz tog razloga, a i u svrhu kasnije ekonomske isplativosti, nužno je u tijeku razvoja automatskih sustava rasklapanja integrirati



mogućnost prilagođavanja rasklapanja različitim modelima istog proizvoda te potom proizvodima sličnih svojstava.

Na primjeru tvrdog diska, vrlo čestog EE proizvoda, analiziran je postupak rastavljanja i pridružena oprema. Pomoću metode DFA izračunata je cijena i trajanje rasklapanja za automatski sustav s jednim i s dva robota, pri čemu se u obje kategorije sustav s dva robota pokazao kao bolje rješenje. Za sustav s dva robota specificirana je oprema dostupna na tržištu i procijenjena njezina vrijednost.

U radu predloženi sustav moguće je implementirati u proizvodne pogone tvrtki koje izrađuju EE opremu, ali i u centre za recikliranje i odvajanje otpada (naprimjer reciklažna dvorišta). Male dimenzije sustava prva je od više prednosti spram postojećih destruktivnih metoda reciklaže. Nadalje, sustavom podrazumijevana dostupnost podataka o materijalima ugradbenih elemenata proizvoda značajno pojednostavnjuje razvrstavanje rastavljenih dijelova (separacija postaje izlišna). Također, radna temperatura ne premašuje iznos sobne temperature, čime se u atmosferu ne ispuštaju opasni plinovi. Za poslove nadgledanja, opsluživanja i održavanja sustava dovoljan je samo jedan kvalificirani radnik, spram uobičajenih destruktivnih metoda koje iziskuju više kvalificiranih radnika.

U budućem radu, uslijedit će daljnji razvoj predloženog i sličnih sustava, s posebnim naglaskom na potrebu istraživanja i izvođenja tehničko-ekonomske analize primjenjivosti s obzirom na raznolike mogućnosti teritorijalnog organiziranja.

## 8. Literatura

- [1] [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/key\\_waste\\_streams/waste electrical electronic equipment weee](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/key_waste_streams/waste_electrical_electronic_equipment_weee). Pristupljeno: 2014-06-14
- [2] Boothroyd, G.; Alting, L. Design for Assembly and Disassembly // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 41(1992), 2; 625-636. (ISSN 0007-8506)
- [3] Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. Product design for manufacture and assembly. New York: M. Dekker, 1994. (ISBN 978-953-6970-86-5)
- [4] Lambert, A. J. D.; Gupta, S. M. Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse and Recycling. Boca Raton: CRC Press, 2005. (ISBN 1-57444-334-8)
- [5] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H. Engineering Design: A Systematic Approach. Springer, 2007. (ISBN 978-1-84628-318-5)
- [6] Travaš, Lovro. Automatsko rasklapanje dotrajalih elektroničkih proizvoda, Diplomski rad br. 702317. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [7] <http://www.statista.com/statistics/275336/global-shipment-figures-for-hard-disk-drives-from-4th-quarter-2010/>. Pristupljeno: 2014-06-14.
- [8] Daimler AG, Mercedes-Benz Cars, *Ekološki certifikat E-klase*, Stuttgart, 2009.
- [9] <http://www.jointec.se/dismantling-euro-pallets>. Pristupljeno 2014-06-23.
- [10] Kunica, Zoran. Oblikovanje proizvoda za sklapanje Boothroyda i Dewhursta. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2000.
- [11] Kunica, Zoran. Automati za montažu [http://titan.fsb.hr/~zkunica/nastava/pms/roboti manip.pdf](http://titan.fsb.hr/~zkunica/nastava/pms/roboti_manip.pdf). Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje. Pristupljeno 2014-06-21.